左侧额中回参与汉字视觉空间分析的 fNIRS 证据*

陈发坤 陈甜 蔡文琦 王小娟 杨剑峰

(陕西师范大学心理学院，西安 710062)

摘 要 左侧额中回(MFG)是汉字阅读脑机制研究发现的一个典型脑区，它表现出在汉字阅读中的特异激活，一种普遍的解释认为其负责了汉字独特的视觉空间加工。但是，该解释没有得到直接的证据支持。本研究操纵汉字材料的视觉呈现空间频率，使用功能性近红外光谱成像(fNIRS)技术对此问题进行探讨。通过构建 3(字类型：真字、假字和非字) × 3(空间频率：完整频谱、低空间频率和高空间频率)的重复测量实验设计，记录被试在完成重复刺激检测的 one-back 任务时 MFG 的血氧浓度变化。结果发现左侧 MFG 表现出显著的字类型主效应，即假字比真字和非字需要更多 MFG 的激活；而且，左侧 MFG 还表现出显著的字类型与空间频率的交互作用，即在低空间频率条件下假字比真字和非字具有更强的 MFG 激活，而在另两种频率条件下并没有发现字类型的显著激活差异。结果表明左侧 MFG 的确对汉字的空间信息敏感，尤其是在需要更多字形/正字法加工的假字条件下以及对低空间频率信息的加工上都需要更多 MFG 的激活。研究结果为左侧 MFG 参与汉字正字法信息的视觉空间加工提供了直接的证据。

关键字 汉字阅读，额中回，空间频率，fNIRS

1 引言

大脑左侧额中回(Middle Frontal Gyrus, MFG)在汉字阅读中的激活是汉字脑机制研究的一个重要发现。该脑区在汉字阅读中的具体功能成为研究者广泛关注的问题，有研究者认为其可能与词典语音提取(Tan et al., 2005)、语义(Tan et al., 2000)、由字形通达语义的加工相关(Tan et al., 2001; Wu et al., 2012)，更为普遍的解释则认为 MFG 参与了汉字独特的复杂视觉空间加工(Siok et al., 2004; Tan et al., 2003; Wu et al., 2012)。但是，MFG 究竟对应着怎样的视觉空间信息加工还缺乏深入探讨，更没有直接的证据表明 MFG 对汉字的视觉空间分析敏感。本研究直接操纵汉字材料的视觉呈现空间频率，对此问题进行深入探讨。

收稿日期: 2021-10-18

* 国家自然科学基金(31671167), 中央高校基本科研业务费专项资金(GK202101010, 2019TS141)。

通信作者: 王小娟, E-mail: wangxj@snnu.edu.cn; 杨剑峰, E-mail: yangjf@snnu.edu.cn

左侧 MFG 被认为是汉字阅读的特异性激活的典型脑区之一。主要的证据来源于 MFG 在阅读汉字材料时比阅读英语等拼音文字表现出更强的激活(Tan et al., 2005)；而且，该脑区的激活不足是汉语发展性阅读障碍的主要缺陷之一(Siok et al., 2004; Siok et al., 2008)。虽然对该脑区在汉字阅读中的功能认识还没有得到统一的结论，但较普遍的观点认为该脑区可能与视觉空间分析相关(Siok et al., 2004; Tan et al., 2003; Wu et al., 2012)。一种解释认为，由于 MFG 与一般的工作记忆有关(Owen et al., 2005)，而汉字识别过程需要更多的视觉工作记忆，因此推测该脑区参与了视觉特征的工作记忆加工(Perfetti et al., 2007; Sun et al., 2011)。另一种解释则认为，MFG 在汉字识别中主要负责空间信息的整合加工，即汉字识别需要对部件之间的关系进行区分，从而需要更多对空间频率信息的加工(Perfetti et al., 2013)。但是，MFG 参与汉字的识别加工是否受到了空间频率加工的影响，还没有得到直接的证据支持。

研究表明，空间频率信息在视觉词汇识别中扮演着重要作用(Kwon & Legge, 2012)，不同的空间频率信息对应着不同的视觉特征加工。高/低空间频率信息都会促进视觉词汇的识别加工，高空间频率信息传递的细节特征(如线条终端等)能促进字母的准确识别(Fiset et al., 2008)，而低空间频率传递的整体特征会加快视觉词汇识别的反应时间(Jordan et al., 2016; 赵婧 等，2013)。

相对于物体识别，词汇识别更多依赖于高空间频率信息。字母或笔画是视觉词汇的基本书写单元，对细节特征(字母和笔画)的高空间频率分析有利于视觉词汇识别(Perfetti et al., 2013; Winsler et al., 2017)。如 Roberts 等人(2013)对脑损伤病人的功能性磁共振成像(fMRI)研究发现，左腹侧枕颞受损的患者对高空间频率的视觉信息不敏感，且患者在阅读和命名任务中表现出反应时的延长。Mercure 等人(2008)的事件相关电位(ERP)实验也发现，相比于低空间频率真字，高空间频率真字引起了左腹侧枕颞电极点更强的 N170 反应，而该脑电成分被认为负责词汇的正字法加工。进一步的 fMRI 研究(Woodhead et al., 2011)也发现，高空间频率图激活了负责视觉词汇识别的左腹侧枕颞区，而低空间频率图没有激活此区域。上述研究表明，在词汇识别中，高空间频率信息参与并影响了早期的视觉词汇识别。

汉字识别可能需要更多依赖于低空间频率信息。汉字属于方块字，识别笔画序列等细节属于高空间频率信息，而部件之间的结构关系等属于低空间频率信息。汉字识别不仅需要区分笔画等高空间频率细节信息，还需要区分部件之间关系的低空间频率信息。比如，区分“凡”和“风”需要依赖高空间频率信息，而区别“杏”和“呆”主要依赖低空间频率信息(Perfetti et al., 2013)。汉字的低空间频率信息反映的词汇整体特征会减少视觉词汇识别的反应时间，促进汉字整体信息的加工(Zhao et al., 2014; 赵婧 等, 2013)。空间组合的方块汉字相对于线

性排列的拼音文字，具有更复杂的空间结构(部件的空间结构关系)，需要更多依赖低空间频率信息(Perfetti et al., 2013)。因此，如果 MFG 反映了汉字的视觉空间加工，其激活就会受到汉字呈现的视觉空间频率信息的调节；尤其是在低空间频率条件下，MFG 会更多参与汉字的阅读加工过程。

但是， MFG 的激活程度还与不同成分的阅读加工相关，这也是前人研究对于 MFG 在汉字阅读中的功能认识不统一的原因。汉字阅读是由视觉信息输入到汉字心理表征通达的过程，在这个复杂的过程中，汉字承载着字形/正字法、语音和语义信息，这三种信息在心理词典中对应着相应记忆存储，汉字阅读就是这三种信息从物理信号输入到心理词典信息通达的加工过程。同时，每种信息的加工过程还可以区分为亚词典和词典水平的加工：亚词典加工是在心理词典信息通达前的加工过程，如字形到语音转换；而词典加工是指心理词典信息的检索、提取、确认等加工过程。MFG 在汉字阅读中的参与激活究竟对应着哪一个加工环节，研究者的结果并不统一，有研究认为 MFG 负责了视觉正字法加工(Siok et al., 2004; Tan et al., 2003; Wu et al., 2012)，也有研究认为其负责词典语音提取(Tan et al., 2005)、语义通达(Tan et al., 2000)、以及与字形通达语义的加工相关(Tan et al., 2001; Wu et al., 2012)。从而，MFG 在汉字阅读加工中的具体功能，仍然是研究者争论的问题。

以往研究主要通过不同类型的汉字材料对比，来识别阅读加工中的不同认知加工成分。研究者通过组合不同的汉字部件可以构建出不同的假字材料，进一步操纵部件的表音、表义特征、以及部件组合的正字法规则性，可以构建出包含正字法信息、亚词典语音/语义信息的假字材料，还可以构建完全不符合正字法规则的非字(笔画组合模式)材料(详见 Wang et al., 2011)。通过不同类型的汉字材料对比，研究者可以识别不同成分的汉字阅读加工。例如，与真字相比，假字和非字不具有语音和语义的词典表征，所以真字>非字，真字>假字的对比可以考察语音、语义词典加工的脑区(Kuo et al., 2004; Wang et al., 2011)。假字虽然不具有词典表征，但它的部件具有表音和表义功能，相对于真字和非字需要更多亚词典加工；同时汉字识别过程中，假字比真字需要更多的部件结构、组合规则等正字法信息加工(Wang et al., 2011)。非字由于是基本的笔画组合，相对于真字和假字需要更多的视觉分析加工(Wang et al., 2011)。因此，有必要操纵不同类型汉字材料，从而深入考察 MFG 参与汉字阅读过程中究竟在哪种阅读加工过程会受到空间频率的影响。

目前，Horie 等人(Horie, Yamasaki, Okamoto, Kan, et al., 2012; Horie, Yamasaki, Okamoto, Nakashima, et al., 2012)的研究同时操纵文字材料的视觉空间频率和文字类型，考察了空间频率对日语汉字(Kanji)和日语假名(Kana)的加工影响。其 ERP 研究(Horie, Yamasaki, Okamoto,

Nakashima, et al., 2012)发现，无论是高还是低空间频率下，Kanji 和 Kana 引起的 P100 和 N170 脑电成分都存在显著差异，但在 N400 脑电成分上都没有差异。P100 和 N170 成分被认为和早期的视觉字形加工相关，而 N400 成分负责高水平的语义加工。表明空间频率只影响了早期的视觉加工，而不影响词典水平的语义加工。该结论得到了他们 fMRI 研究(Horie, Yamasaki, Okamoto, Kan, et al., 2012)的支持，即高、低空间频率下，Kanji 和 Kana 引起的大脑激活差异都只出现在早期视觉语言加工的脑区(腹侧枕颞和下顶叶)。以上研究表明，空间频率可能只影响阅读过程的特定加工成分。

因此，本研究同时操纵了汉字类型和空间频率，深入探究空间频率是在正字法、语音还是语义信息的词典加工上对左侧 MFG 的激活产生影响，从而揭示 MFG 在汉字阅读中的功能。实验采用 one-back 任务，同时结合 fNIRS 技术记录被试的大脑血氧浓度变化，尤其是 MFG 脑区的激活程度。实验操纵了三种不同的视觉呈现空间频率(完整频谱、低、高空间频率)和三种字类型(真字、假字和非字)，考察 MFG 在汉字阅读中的激活是否会受到视觉空间频率的影响，尤其是深入探讨空间频率会影响汉字阅读的何种加工成分(正字法或语音、语义信息的词典加工)。

2 方法

2.1 被试

共招募在校大学生 31 名(男生 14 人)，年龄在 18~27 岁之间(20.08 ± 2.49 岁)。所有被试均为右利手，视力或矫正视力正常，无色盲、色弱等眼疾；无脑部疾病或精神疾病。所有被试在实验前填写《被试知情同意书》，实验结束后获得适量报酬。

2.2 实验设计与材料

采用 3(汉字类型：真字、假字、非字) × 3(空间频率：完整、低频、高频)的实验设计。

实验材料包含真字、假字和非字三种类型：真字都是左右结构的形声字，它们的形旁和声旁都不能单独成字；假字是将真字条件下的声旁与形旁随机组合，形成符合正字法规则但不是真实存在的刺激材料；非字则是将假字的两个部件笔画打乱之后随机组合形成。从而确保了三种类型的汉字材料在部件、笔画数上都得到了很好地匹配。每种类型的汉字材料都使用三种方式来呈现：完整、低和高空间频率(如图 1A 所示)。完整频谱条件是以灰色为背景(灰度值为 128)的黑字图片材料，选用黑字灰底是基于本实验三种空间频率图片的整体对比效果以及前人研究使用黑字灰底图(Calderone et al., 2013; Horie, Yamasaki, Okamoto, Kan, et

al., 2012; Petras et al., 2019)；低空间频率呈现的汉字失去了轮廓信息，保留了中间的模糊形象；而高空间频率条件下呈现的汉字只保留了轮廓信息。低、高空间频率是在 matlab 环境下对完整频谱图片进行高斯空间频率过滤，低、高空间频率过滤的截止频率分别为 6 和 42 周(对应 2 周/度和 14 周/度或 2 cpd 和 14 cpd)。空间频率过滤后的图片经过灰度值调整来匹配灰度值为 128 的屏幕背景，最终呈现的三种空间频率刺激图的效果和前人研究相似(Calderone et al., 2013; Horie, Yamasaki, Okamoto, Kan, et al., 2012; Petras et al., 2019)。这样，每种条件有 60 个刺激材料，9 个实验条件共 540 个刺激。

2.3 实验任务与程序

刺激材料被呈现在分辨率为 1280×1024 的电脑屏幕上，被试舒适地坐在眼睛距离屏幕约 70 cm 处，使得刺激对被试形成 3 度视角。

使用组块(Block)的方式呈现刺激材料，在每个组块呈现相同条件下的 6 个不同刺激。每个刺激呈现 500 ms，然后空屏 2000 ms(如图 1B 所示)。被试的任务是对连续呈现的刺激进行判断，如果当前刺激与上一个刺激相同，被试就用右手食指按空格键反应，如果不相同则不需要反应。每个组块被试需要平均反应 1 次(0~2 次随机变化)。平均每个组块时长 17.5 s，然后呈现 12.5 s 的“+”注视符。每个条件的 60 个刺激材料被随机分成 10 个组块，所有 9 个条件的 90 个组块按条件平衡分成 6 个部分完成。每个部分的时长约为 8 分钟，被试在 1 小时内完成全部实验任务。刺激的呈现、数据记录使用 E-Prime 3.0 完成。

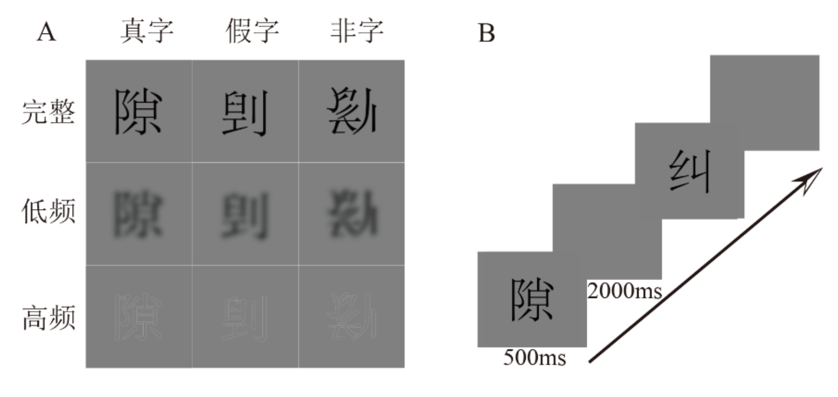


图 1 实验设计及材料举例(A)，以及实验程序(B)

2.4 数据收集

fNIRS的空间分辨率能达到2~3 cm，测量深度为1.5~2 cm(Pinti et al., 2020)，完全可以较为准确地测量大脑皮层的活动。本研究采用日立ETG-7100功能性近红外光谱成像系统探测氧合血红蛋白(HbO)和脱氧血红蛋白(HbR)的浓度变化，双波长(695 nm和830 nm)，采样率10 Hz(Liu et al., 2019)。研究使用了4×4的支架，支架上交错放置8个发射和8个接收光极，光极间的距离为3 cm；所有光极的布局形成了24个通道。由于本研究重点关注左侧额中回，因此

使用该支架覆盖了左侧额叶，具体是根据国际标准10-20系统将支架中间的通道12放置在F3。每个被试的通道定位数据通过3D定位仪(FASTRAK, Polhemus, ColChester, VT, USA)收集，并使用SPM空间配准(Spatial Registration)功能得到通道大脑位置信息(Ye et al., 2009)。结果发现在额中回的有通道3、6、9、10、12、13和16。此外，本研究还使用一个3×5共22个通道的支架覆盖左侧枕颞的梭状回(FFG)中部区域，支架中间的通道36放置在O1。梭状回中部被识别为视觉词形区(VWFA)，本研究尝试使用fNIRS技术探讨该区域是否受字类型和空间频率的影响，以复制前人研究。

2.5 数据分析

所有被试都完成了任务，三个被试的数据因为有效性(两个被试的行为反应错误率超过30%，一个在 fNIRS 数据采集时头动过大)被去除，最后纳入数据分析的有效被试为 28 名。

被试在每个条件下只对 10 个重复刺激进行了按键反应，因此对行为的反应时数据只做了被试分析，不做项目分析。在反应时数据整理时，先排除正负 2.5 个标准差之外的极端数据，然后计算每个被试在 9 种条件下的平均反应时和正确率。对正确率和反应时分别进行了3(字类型：真、假、非字) × 3(空间频率：完整、低频、高频)重复测量的方差分析，条件间的多重比较采用配对样本 *t* 检验进行两两比较，对检验的显著性水平进行 Bonferroni 校正(由于本研究中多重校正的次数为 3，因此显著性标准为 $p < 0.05/3$)。

fNIRS 数据使用 Homer2 软件(Huppert et al., 2009)分析，处理流程和相关参数参考Brigadoi 等人(2014)的文章。对每个被试，首先将原始光强度数据转换成相对变化的光密度(OD)数据；然后对 OD 数据进行运动成分识别和校正；带通滤波的截止频率为 0.01~0.5 Hz，以减少缓慢的漂移和高频噪声(Brigadoi et al., 2014; Cui et al., 2011)；滤波后通过比尔-兰伯特定律(Beer-lambert law)把 OD 数据转化成 HbO 和 HbR 浓度数据。

有研究表明 fMRI 中 BOLD 信号与 HbO 的相关性明显高于与 HbR 的相关，因此建议以HbO 数据作为分析指标(Sato et al., 2006; Stoeckel & Binkofski, 2010)。通过视觉查看法(Defenderfer et al., 2017)，通道数据的峰值在每个 block 开始后的大约 9 s，因此本研究选择7~11 s 时间窗的数据计算平均峰值，得到每个被试在每个通道、每个条件的平均 HbO 浓度变化值。然后对每个通道的数据进行 3(字类型：真、假、非字) × 3(空间频率：完整、低频、高频)重复测量的方差分析，条件间的多重比较采用配对样本 t 检验进行两两比较，对检验的显著性水平进行 Bonferroni 校正($p < 0.05/3$)。

通道的方差分析结果使用 EasyTopo 软件进行可视化(Tian et al., 2013)。

3 结果

3.1 行为结果

被试的平均反应正确率和反应时如图 2 所示，3(字类型：真、假、非字) × 3(空间频率：完整、低频、高频)的重复测量方差分析结果详见表 1。

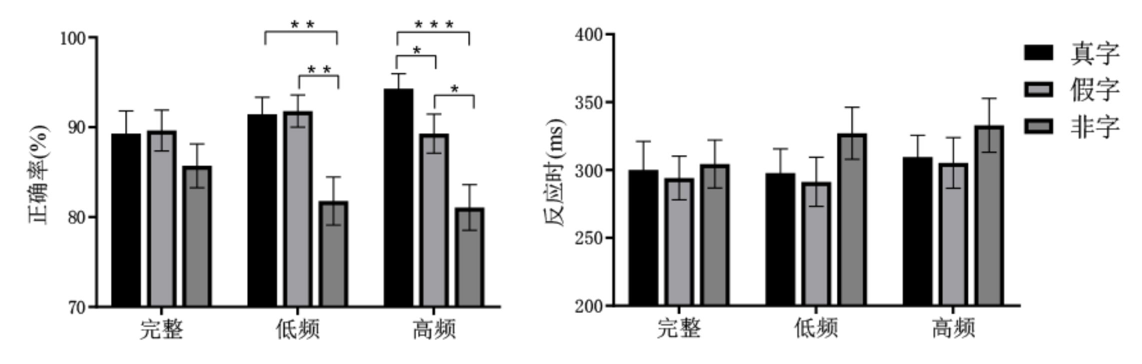


图 2 正确率和反应时结果

表 1 字类型和空间频率主效应及交互作用的正确率和反应时结果

效应类型	正确率			反应时		
	F	*p*	η_p^2	*F*	*p*	η_p^2
字类型	F (2,54) = 12.88	0.001	0.323	F (2,54) = 7.02	0.002	0.206
空间频率	F (2,54) = 0.04	0.964	0.001	F (2,54) = 1.00	0.373	0.036
交互作用	F (4,108) = 3.72	0.007	0.121	F (4,108) = 0.98	0.419	0.035

正确率的方差分析结果发现，三种字类型的主效应显著，多重比较结果显示，非字正确率(M = 0.87, SD = 0.09)显著低于真字(M = 0.95, SD = 0.05), (t(27) = -4.21, p < 0.001, Cohen d = 0.85)，也显著低于假字(M = 0.93, SD = 0.05), (t(27) = -3.90, p = 0.001, Cohen d = 0.82)，但真字和假字之间没有差异(t(27) = 0.10, p = 0.323, Cohen d = 0.20)。表明非字识别要比真字和假字识别难，真字和假字的识别难度没有差异。行为结果没有发现空间频率的主效应，但是发现了显著的交互作用。进一步的简单效应分析发现：在完整条件下三种字类型没有差异(F(2, 54) = 0.86, p = 0.428)，在低频(F(2, 54) = 9.25, p < 0.001)和高频(F(2, 54) = 12.18, p < 0.001)条件下都存在显著的字类型差异。但是，两种空间频率下的字类型差异模式不同：低频条件主要是非字的正确率小于假字(t(27) = -3.24, p = 0.003, Cohen d = 0.65)，也小于真字(t(27) = -3.58, p = 0.001, Cohen d = 0.73)，假字和真字之间没有差异(t(27) < 0.001, p = 1.0, Cohen d = 0)；而在高频下，非字正确率低于假字(t(27) = -2.62, p = 0.014, Cohen d = 0.51)，假字又依次低于真字(t(27) = -2.66, p = 0.013, Cohen d = 0.51)。上述结果表明，汉字识别的确受到了空间频率信息的影响，不同类型的汉字材料受空间频率信息的影响不同。

反应时的方差分析结果发现，字类型的主效应显著，多重比较结果显示非字反应时(M= 316, SD = 103)显著慢于假字(M = 291, SD = 95), ($t(27)$ = 3.49, p = 0.002, Cohen d = 0.70), 也慢于真字(M = 298, SD = 98), ($t(27)$ = 2.34, p = 0.027, Cohen d = 0.45)，但假字和真字之间没有差异($t(27)$ = 1.15, p = 0.262, Cohen d = 0.22)。也表明非字识别要比真字和假字识别难，真字和假字的识别难度没有差异。反应时的结果没有发现显著的空间频率主效应及其与字类型的交互作用。

3.2 近红外结果

对额中回通道的 HbO 浓度进行 3(字类型：真、假、非字) × 3(空间频率：完整、低频、高频)的重复测量方差分析。结果发现左侧额中回所有通道上都没有空间频率的主效应，但发现左侧额中回通道 9 的字类型主效应($F(2, 54)$ = 5.47, p = 0.007, η_p^2 = 0.168) (脑区定位见图 3 左)，通道 10 和 13 的交互作用(通道 10: $F(4, 108)$ = 3.03, p = 0.021, η_p^2 = 0.101; 通道 13: $F(4, 108)$ = 2.56, p = 0.043, η_p^2 = 0.087) (脑区定位见图 4 左)。

对字类型主效应显著的额中回通道 9 进行多重比较的统计分析(见图 3 右)，结果发现该通道表现出真字与非字的 HbO 浓度变化没有显著差异($t(27)$ = 0.31, p = 0.760, Cohen d = 0.10)，而假字的 HbO 浓度变化要显著高于真字条件($t(27)$ = 4.00, p = 0.001, Cohen d = 0.89)，也要高于非字条件($t(27)$ = 2.66, p = 0.013, Cohen d = 0.84)。结果表明额中回(通道 9)对仅保留正字法信息的假字的加工更敏感。

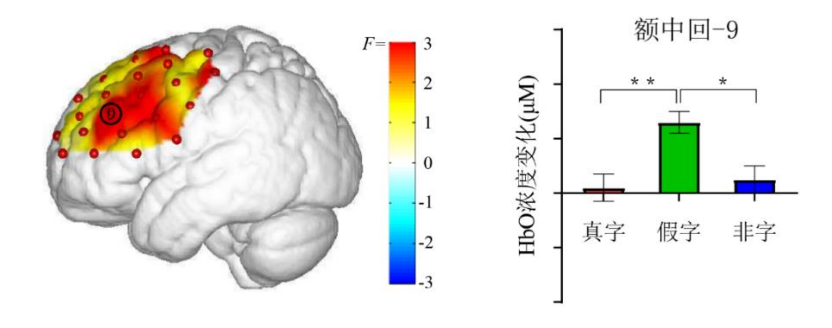


图 3 字类型主效应 F 值热力图(左)以及额中回显著通道下的字类型差异(右)

进一步的简单效应分析表明，额中回通道 10 和 13 的三种字类型在低频条件下的差异显著(通道 10: $F(2, 54)$ = 5.62, p = 0.006; 通道 13: $F(2, 54)$ = 4.45, p = 0.016)，但是在完整(通道 10: $F(2, 54)$ = 2.13, p = 0.129; 通道 13: $F(2, 54)$ = 2.64, p = 0.081)和高频条件下(通道 10: $F(2, 54)$ = 1.03, p = 0.364; 通道 13: $F(2, 54)$ = 0.42, p = 0.661)的差异都不显著。之所以在低频条件发现了显著的字类型效应，是因为假字条件比真字和非字诱发了额中回两个通道的更大激活(多重比较结果详见表 2 和图 4 右)。

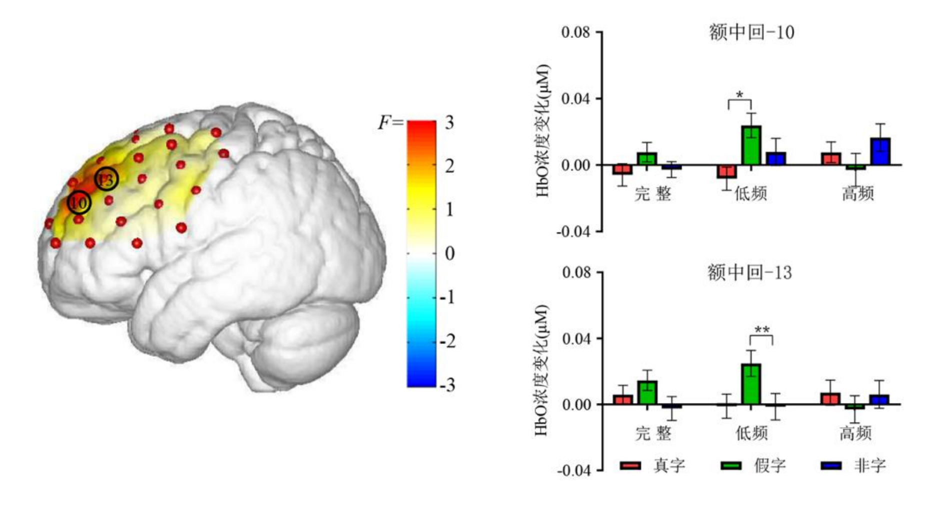


图 4 交互作用 *F* 值热力图(左)以及额中回显著通道下各条件的差异结果(右)

表 2 额中回通道(10 和 13)不同空间频率下真字、假字和非字的两两对比结果

条件		通道 10(额中回)			通道 13(额中回)		
		t(27)	*p*	Cohen *d*	*t*(27)	*p*	Cohen *d*
完整	真-假字	-2.23	0.034	0.42	-1.16	0.255	0.22
	真-非字	-0.37	0.712	0.07	1.12	0.275	0.21
	假-非字	1.80	0.083	0.35	2.33	0.027	0.44
低频	真-假字	-3.17	0.004	0.60	-2.30	0.030	0.44
	真-非字	-1.41	0.169	0.27	0.03	0.978	0.01
	假-非字	2.46	0.020	0.47	3.70	0.001	0.70
高频	真-假字	0.92	0.365	0.18	1.54	0.134	0.29
	真-非字	-0.79	0.436	0.15	0.07	0.942	0.01
	假-非字	-1.13	0.268	0.21	-0.64	0.528	0.12

为了数据结果报告的全面性以及对比额中回通道的结果，本研究还对非额中回通道进行了相同的 3×3 重复测量方差分析，统计结果显著的通道如附件所示。其中，发现了顶叶附近的中央后回对非字的激活最强；此外，并没有发现左侧梭状回附近通道的自变量效应；但在枕中回的通道 41 发现了汉字类型和空间频率的交互作用，表现为三种字类型在完整和低频条件下差异显著，而在高频条件下的差异不显著，详细信息见附表 3 和附图 2。

4 讨论

本研究通过操纵字类型和空间频率两个因素，使用 fNIRS 技术考察大脑左侧额中回(MFG)在汉字阅读中对视觉空间频率的敏感性。行为结果发现正确率和反应时上都存在字类型加工的主效应，在正确率上发现了字类型与空间频率的交互作用。fNIRS 结果发现了左侧

MFG 的字类型主效应，即假字要比真字和非字更多激活 MFG；而且，左侧 MFG 还表现字类型与空间频率的交互作用，即在低空间频率条件下假字比真字和非字具有更强的 MFG 激活，而在另两种频率条件下并没有发现字类型的显著差异。表明 MFG 的确对汉字的空间频率信息敏感，尤其是在需要更多字形/正字法加工的假字条件下以及对低空间频率信息的加工上都需要 MFG 的更强激活。下面进行详细讨论。

4.1 不同类型的汉字材料对视觉空间分析的依赖程度不同

本研究的行为结果中，在正确率和反应时上都发现了字类型的主效应，表现为非字的记忆、识别的难度高于真字和假字。此结果与 Yang 等人(2011)研究中使用类似真字、假字和非字材料以及相同的 one-back 任务得到的行为结果是一致的。首先，非字的记忆和识别难度更大，可能是因为非字只有笔画信息，只能对笔画进行基本的视觉加工。这一观点得到 Liu 等人(2008)以及 Wang 等人(2011)研究的支持，他们发现非字比真字、假字更多激活视觉皮层(枕中回和梭状回)和顶叶，研究者认为这些激活脑区负责对汉字笔画进行基本的视觉加工(Liu et al., 2008)。而在本研究中也发现，非字比真字、假字更多激活了顶叶附近的中央后回。其次，假字和真字的工作记忆任务更容易，可能是因为正字法、语音和语义等信息能够促进工作记忆任务的完成。这一观点同样得到前人研究的支持。比如假字比真字、非字更多激活双侧 MFG 和梭状回，这些脑区可能反映了汉字的正字法加工(Liu et al., 2008)；并且真字比假字、非字更多激活颞叶后部和中部区域(Liu et al., 2008; Yang et al., 2011)，这两个区域被认为分别负责从书写到语音的映射(Booth et al., 2006; Wang et al., 2011)和语义加工(Wu et al., 2012)。在本研究中也发现假字比非字和真字更多激活了 MFG 脑区；尽管本研究没有发现真字更多激活的脑区，但这可能是因为本研究中的支架并未覆盖到颞叶区域。另外，需要提及的是，在 Yang 等人(2011)的研究中，被试对完全相同的材料完成了词汇判断的行为任务，得到了完全不一样的结果，表现为假字的难度最大，非字的难度最小；说明任务能够调节对不同类型汉字的加工需求。

此外，本研究的行为结果发现空间频率信息会影响到汉字识别的作业成绩。这一结果与前人的研究一致，在 Wang 和 Legge (2018)的研究中，被试阅读以不同空间频率呈现的视觉词汇时，阅读正确率随着空间频率的改变而变化。本研究结果还发现，不同类型汉字材料的识别对视觉空间频率信息的依赖程度不同。刺激材料越不像真字，对于低空间频率信息的依赖程度越大。具体表现在仅以高空间频率呈现的材料上，由于低空间频率信息的缺失导致了被试对非字的反应正确率依次低于假字和真字条件。汉字识别更多依赖于低空间频率信息的结果与郭小朝(1999)的行为研究类似，其结果显示了呈现的汉字的空间频率在低频率范围内

升高时，汉字命名的正确率提高最快，而在更高频率范围内升高时，正确率变化较小。

因此，与前人研究一致，本研究结果表明汉字阅读需要更多依赖视觉低空间频率信息的加工。对于汉字低空间频率信息的敏感程度可能反映了阅读者的熟练水平，如 Jordan 等人(2016)的研究发现，高水平阅读者比低水平阅读者在阅读低空间频率呈现的句子时具有更大的反应时优势。阅读者对于低空间频率信息的有效加工，可能直接影响其阅读能力。甚至低空间频率的加工受损可能是导致汉语发展性阅读障碍的原因之一(Zhao et al., 2014)。

4.2 MFG 在汉字阅读中负责正字法的视觉空间分析

重要的是，本研究结果为 MFG 在汉字阅读中的功能认识提供了直接的证据。左侧 MFG 是汉字阅读脑机制研究发现的一个典型脑区。有研究者认为 MFG 可能和音节的语音提取(Tan et al., 2005)，基于记忆的正字法、语音和语义词典整合(Perfetti et al., 2005)，正字法-语音(语义)转换(Tan et al., 2001; Wu et al., 2012)，语义通达(Tan et al., 2000)，以及书写(Cao & Perfetti et al., 2016; Feng et al., 2020)有关。目前，对左侧 MFG 在汉字阅读中的功能认识仍然没有得到统一的结论。

比较普遍的观点认为 MFG 与汉字的视觉空间分析有关。由于汉字具有区别于拼音文字系统的书写特点，需要复杂的空间加工，从而 MFG 成为汉字特异的阅读功能脑区(Siok et al., 2004; Tan et al., 2003; Wu et al., 2012)。但是，MFG 具体负责哪种视觉空间分析，却没有得到深入探讨。有研究者认为汉字识别需要复杂的视觉空间分析，进而推测 MFG 可能参与了空间信息的工作记忆加工(Kwon et al., 2002; Siok et al., 2008)。在 Sun 等人(2011)的一项 fMRI 研究中，研究者系统操纵汉字部件间的距离，结果在左侧 MFG 发现了部件距离效应，从而认为 MFG 的激活是因为部件距离增加了视觉工作记忆的加工负荷。但是，部件距离的变化同时也意味着视觉空间频率的改变，因为部件关系就包含了低空间频率信息(Perfetti et al., 2013)。本研究没有改变汉字材料的部件距离，只操纵了汉字呈现的空间频率信息，对比三种汉字材料，直接探讨 MFG 在汉字阅读的视觉空间分析作用。

本研究在左侧 MFG 脑区发现了假字比真字和非字需要更多的激活，该研究结果与前人使用 fMRI 技术得到的研究结果是一致的。比如，在 Yang 等人(2011)和 Liu 等人(2008)的 fMRI 研究中发现，假字要比真字和非字更多激活左侧 MFG 脑区。该脑区在汉字阅读中的激活被认为与汉字需要复杂的视觉空间分析加工有关(Siok et al., 2004; Tan et al., 2003; Wu et al., 2012)。本研究中的假字条件是由部件构成、符合正字法规则的材料，它们的部件都没有外显的语音和语义信息；而真字条件同时具有正字法、语音和语义信息。被试在完成 one-back 的工作记忆任务时，在假字条件只能利用汉字的正字法信息，而真字条件下可以借助

于语音和语义信息。此观点得到 Wang 等人(2011)fMRI 研究一定的支持，他们使用了类似的真字、假字和非字材料以及相同的实验任务，独立成分分析的结果发现真字特异性地激活了负责语音、语义加工的颞叶后部、中部区域。因此，本研究中发现假字比真字更多激活了 MFG 脑区，可能反映了其在汉字正字法信息的视觉空间分析中的作用。同样，本研究所使用的非字条件是由打乱的笔画组成的材料，只具备基本的视觉特征，不具备正字法信息，它们相对于假字材料在 MFG 脑区的激活不足就再次表明 MFG 可能参与了汉字视觉空间分析的正字法加工。值得注意的是，MFG 对假字的激活更强确实是因为正字法信息的加工，而不是难度导致的。因为本研究的行为结果发现假字和真字没有难度差异，但是假字比真字更多激活了该脑区；该脑区对假字有更强的激活可能是因为假字只能依赖正字法等视觉信息。并且，行为结果还发现假字比非字的记忆和识别更容易，但假字比非字依然更多激活额中回；进一步验证了该区域对假字有更强的激活是因为加工了假字的正字法信息。因为如果 MFG(通道 9)只对任务难度敏感，那非字应该比假字更多激活该区域，而本研究中并未发现这样的结果。因此，本研究发现的左侧 MFG 进行正字法信息加工的结果，支持了该脑区对正字法进行视觉特征的工作记忆的解释。

然而，本研究发现的 MFG 参与汉字阅读加工的字类型效应仅仅表现在低空间频率条件。fNIRS 的结果在 MFG 脑区发现了显著的字类型与空间频率的交互作用，三种字类型差异只表现在低空间频率条件，在完整频谱和高空间频率条件下都没有发现字类型的差异。这一结果可能是因为汉字识别需要更多依赖低空间频率信息的加工(Perfetti et al., 2013)。在汉字识别过程，被试不仅需要精细地区分笔画细节，还需要准确区分出部件之间的关系。而笔画细节识别主要依赖于对高空间频率信息加工，部件关系识别需要依靠低空间频率信息的加工。从而，相对于拼音文字识别，汉字识别需要更多的低空间频率信息加工(Perfetti et al., 2013)。此外，汉字加工需要更多依赖低空间频率信息还得到了脑功能成像研究的证据支持。Calderone 等人(2013)的 fMRI 研究发现，精神分裂症患者的视觉受损和背外侧前额叶(包括 MFG)对低空间频率的加工异常有关。研究者要求精神分裂症患者和健康控制组观看完整频谱、低和高空间频率的物体图，结果发现控制组的 MFG 表现出对低空间频率的敏感性，而精神分裂症患者的 MFG 没有这种敏感性；表明在视觉识别中，低空间频率信息会影响 MFG 的激活。本研究通过 fNIRS 技术表明，对低空间频率信息的加工会影响 MFG 在汉字阅读中的激活。该研究结果支持了左侧 MFG 负责空间信息整合加工的解释。

值得注意的是，研究者对于 MFG 的功能认识之所以存在争论，有可能是因为左侧 MFG 存在功能分离的亚脑区。在本研究的结果中，通道 9、10 和 13 都属于 MFG，但通道 9 只表

现出字类型的主效应，通道 10 和 13 却表现出字类型与空间频率的交互作用。这表明，不同亚脑区可能存在着加工性质的区别。这一结论与 Liu 等人(2007)的 fMRI 研究相一致，实验要求英语为母语的被试用正字法-语音，正字法-语义和正字法-语音-语义三种方式学习汉语；结果发现三种学习方式下都激活了 MFG，但是正字法-语音-语义组比其他两组更多激活了内上侧的 MFG(BA6)。表明至少在汉字学习中 MFG 可能存在功能不同的子区域。在一项对汉字阅读的元分析研究中(Zhao et al., 2017)，同样发现了 MFG 存在两个区域的激活，前部 MFG 位于 BA9 区，后部 MFG 靠近中央前回，前者对任务对比敏感，而后者对刺激对比敏感。但是，本研究使用的 fNIRS 技术存在着空间定位的不精确，虽然我们发现了 MFG 脑区的不同通道上的功能分离，表明 MFG 存在着功能不同的亚区域的可能，还需要后续研究深入探究，以细致地揭示 MFG 亚区域在汉字阅读中的作用。

4.3 空间频率信息与背腹侧语言加工通路

需要提及的是，本研究还发现了字类型与空间频率的交互作用。主要是在 MFG 的通道 10 和 13，以及枕中回区域(见附件)。与 MFG 不同的是，枕中回脑区的交互作用表现为在完整频谱和低空间频率条件下发现了字类型效应，在高空间频率条件下并没有发现字类型的差异。交互作用的结果可能与词汇识别的背、腹侧神经通路的不同分工有关。

一方面，MFG 和枕中回都表现出字类型与空间频率的交互作用，这可能是与背、腹侧视觉通路负责不同空间频率信息的加工有关(Ashtiani et al., 2017; 赵婧 等, 2013)。研究表明，背侧视觉通路主要加工 0~4 cpd 的低空间频率，而腹侧视觉通路主要加工 4 cpd 以上的高空间频率(Allen et al., 2009; Leonova et al., 2003)。本研究采用的低空间频率为 2 cpd，高空间频率为 14 cpd，前者主要由背侧视觉通路加工，后者主要由腹侧视觉通路加工。在 MFG 和枕中回都发现字类型与空间频率的交互作用，是因为它们都属于汉字阅读的背侧通路脑区。在低空间频率呈现条件下，汉字的低空间频率信息都能在枕中回和 MFG 脑区得到加工，三种字类型在低空间频率信息上的差异就得到了加工；而在高空间频率呈现条件下，背侧视觉通路对于三种字类型的高空间频率信息不敏感，从而没有表现出不同字类型的差异。

MFG 与枕中回的交互作用模式又不相同，这与它们在背侧通路上的负责不同成分的汉字加工有关。在汉字识别的背、腹侧神经通路的分工中，背侧通路进行快速但粗糙的加工，在前额叶皮层推测可能的结果；推测的可能结果需要和腹侧视觉通路进行的精细慢速加工(细节信息)相结合，从而快速准确地确认物体(Calderone et al., 2013; Kveraga et al., 2007)。在背侧通路，枕中回是负责初级的视觉空间加工的脑区(Liu et al., 2008; Sun et al., 2011)，因而本实验发现枕中回在完整频谱和低空间频率条件下，都表现出对假字的敏感性。而 MFG 对

应着高水平的加工，仅在低空间频率条件下表现出对假字的敏感性。我们的结果与已有的发现一致，背侧脑区对低空间频率的日语假名(Kana)和日语汉字(Kanji)有激活差异，而对高空间频率的 Kana 和 Kanji 没有激活差异(Horie, Yamasaki, Okamoto, Kan, et al., 2012)。根据物体识别的框架与填充模型(Calderone et al., 2013)，低空间频率的整体信息从初级视觉区域快速传递到前额皮层，然后前额皮层推测几个可能的物体，自上而下来促进细节加工(Peyrin et al., 2010)。在本实验中，低空间频率条件下，汉字信息先从视觉皮层快速传递到前额皮层的 MFG 进行快速但粗糙的加工，所以枕中回和 MFG 对低空间频率条件下的假字都敏感；但是在完整频谱条件下，汉字识别可以不需要 MFG 的自上而下加工，从而没有表现出对假字加工的敏感。

4.4 研究不足与展望

受限于 fNIRS 的技术限制，本研究不可避免地存在着局限。首先，本实验在左脑后部区域放置了一个 3×5 的支架，期望探讨位于左侧梭状回中部脑区的视觉词形识别区的效应。从附件可以看出，实验结果并没有发现视觉词形识别区相近通道的自变量效应，这可能与该脑区位于腹侧颞枕交界区有关，使用 fNIRS 技术较难准确定位该脑区，从而没有探测到该脑区的活动。同时，也就造成了后部的支架没有充分覆盖视觉加工区域，在实验结果中没有观测到视觉加工的相关通道表现出空间频率的主效应。

其次，本研究结果初步提出了 MFG 可能存在亚脑区的功能分离，还指出了基本的空间频率视觉信息会影响脑区对不同类型汉字材料的加工。但是，对于上述结果的原理机制还无法充分解释或回答，还需要细致深入地探讨，甚至需要借助空间定位更加准确、能够观测全脑的 fMRI 技术来展开研究。

5 结论

本研究使用三种汉字刺激类型，并以完整频谱、低空间频率和高空间频率三种方式呈现刺激材料，结果发现大脑左侧 MFG 在汉字识别中的激活，研究结果为 MFG 参与汉字的视觉空间加工提供了直接的实验证据，丰富了 MFG 参与汉字阅读的认知功能。

参考文献

Allen, P. A., Smith, A. F., Lien, M.-C., Kaut, K. P., & Canfield, A. (2009). A multistream model of visual word recognition. *Attention Perception & Psychophysics*, *71*(2), 281–296.

Ashtiani, M. N., Kheradpisheh, S. R., Masquelier, T., & Ganjtabesh, M. (2017). Object categorization in finer levels relies more on higher spatial frequencies and takes longer. *Frontiers in Psychology*, *8*, 1261.

Brigadoi, S., Ceccherini, L., Cutini, S., Scarpa, F., Scatturin, P., Selb, J., . . . Cooper, R. J. (2014). Motion artifacts in functional near-infrared spectroscopy: A comparison of motion correction techniques applied to real cognitive data. *Neuroimage*, *85*(Pt. 1), 181–191.

Calderone, D. J., Hoptman, M. J., Martinez, A., Nair-Collins, S., Mauro, C. J., Bar, M., . . . Butler, P. D. (2013). Contributions of low and high spatial frequency processing to impaired object recognition circuitry in schizophrenia. *Cerebral Cortex*, *23*(8), 1849–1858.

Cao, F., & Perfetti, C. A. (2016). Neural signatures of the reading-writing connection: Greater involvement of writing in Chinese reading than English reading. *Plos One*, *11*(12), e0168414.

Cui, X., Bray, S., Bryant, D. M., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2011). A quantitative comparison of NIRS and fMRI across multiple cognitive tasks. *Neuroimage*, *54*(4), 2808–2821.

Defenderfer, J., Kerr-German, A., Hedrick, M., & Buss, A. T. (2017). Investigating the role of temporal lobe activation in speech perception accuracy with normal hearing adults: An event-related fNIRS study. *Neuropsychologia*, *106*, 31–41.

Feng, X. X., Altarelli, I., Monzalvo, K., Ding, G. S., Ramus, F., Shu, H., . . . Dehaene-Lambertz, G. (2020). A universal reading network and its modulation by writing system and reading ability in French and Chinese children. *eLife*, *9*, e54591.

Fiset, D., Blais, C., Ethier-Majcher, C., Arguin, M., Bub, D., & Gosselin, F. (2008). Features for identification of uppercase and lowercase letters. *Psychological Science*, *19*(11), 1161–1168.

Guo, X. C. (1999). Effects of spatial frequency, strokes and word frequency on Chinese character recognition. *Chinese Journal of Ergonomics*, *5*(4), 5–11.

[郭小朝. (1999). 空间频率、笔画数及字频对汉字识别的影响. *人类工效学*, *5*(4), 5–11.]

Horie, S., Yamasaki, T., Okamoto, T., Kan, S., Ogata, K., Miyauchi, S., & Tobimatsu, S. (2012). Distinct role of spatial frequency in dissociative reading of ideograms and phonograms: An fMRI study. *Neuroimage*, *63*(2), 979–988.

Horie, S., Yamasaki, T., Okamoto, T., Nakashima, T., Ogata, K., & Tobimatsu, S. (2012). Differential roles of spatial

frequency on reading processes for ideograms and phonograms: A high-density ERP study. *Neuroscience Research*, *72*(1), 68–78.

Huppert, T. J., Franceschini, M. A., Diamond, S. G., & Boas, D. A. (2009). HomER: A review of time-series analysis methods for near-infrared spectroscopy of the brain. *Applied Optics*, *48*(10), D280–D298.

Jordan, T. R., Dixon, J., McGowan, V. A., Kurtev, S., & Paterson, K. B. (2016). Fast and slow readers and the effectiveness of the spatial frequency content of text: Evidence from reading times and eye movements. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *42*(8), 1066–1071.

Kuo, W. J., Yeh, T. C., Lee, J. R., Chen, L. F., Lee, P. L., Chen, S. S., . . . Hsieh, J. C. (2004). Orthographic and phonological processing of Chinese characters: An fMRI study. *Neuroimage*, *21*(4), 1721–1731.

Kveraga, K., Boshyan, J., & Bar, M. (2007). Magnocellular projections as the trigger of top-down facilitation in recognition. *Journal of Neuroscience*, *27*(48), 13232–13240.

Kwon, H., Reiss, A. L., & Menon, V. (2002). Neural basis of protracted developmental changes in visuo-spatial working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *99*(20), 13336–13341.

Kwon, M., & Legge, G. E. (2012). Spatial-frequency requirements for reading revisited. *Vision Research*, *62*, 139–147.

Leonova, A., Pokorny, J., & Smith, V. C. (2003). Spatial frequency processing in inferred PC- and MC-pathways. *Vision Research*, *43*(20), 2133–2139.

Liu, C., Zhang, W. T., Tang, Y. Y., Mai, X. Q., Chen, H.-C., Tardif, T., & Luo, Y. J. (2008). The Visual Word Form Area: Evidence from an fMRI study of implicit processing of Chinese characters. *Neuroimage*, *40*(3), 1350–1361.

Liu, J. Q., Zhang, R. Q., Geng, B. B., Zhang, T. Y., Yuan, D., Otani, S., & Li, X. (2019). Interplay between prior knowledge and communication mode on teaching effectiveness: Interpersonal neural synchronization as a neural marker. *Neuroimage*, *193*, 93–102.

Liu, Y., Dunlap, S., Fiez, J., & Perfettil, C. A. (2007). Evidence for neural accommodation to a writing system following learning. *Human Brain Mapping*, *28*(11), 1223–1234.

Mercure, E., Dick, F., Halit, H., Kaufman, J., & Johnson, M. H. (2008). Differential lateralization for words and faces: Category or psychophysics? *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20*(11), 2070–2087.

Owen, A. M., McMillan, K. M., Laird, A. R., & Bullmore, E. (2005). N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human Brain Mapping*, *25*(1), 46–59.

Perfetti, C., Cao, F., & Booth, J. (2013). Specialization and universals in the development of reading skill: How Chinese research informs a universal science of reading. *Scientific Studies of Reading*, *17*(1), 5–21.

Perfetti, C. A., Liu, Y., Fiez, J., Nelson, J., Bolger, D. J., & Tan, L. H. (2007). Reading in two writing systems: Accommodation and assimilation of the brain's reading network. *Bilingualism: Language and Cognition*, *10*(2), 131–146.

Perfetti, C. A., Liu, Y., & Tan, L. H. (2005). The lexical constituency model: Some implications of research on Chinese for general theories of reading. *Psychological Review*, *112*(1), 43–59.

Petras, K., Ten Oever, S., Jacobs, C., & Goffaux, V. (2019). Coarse-to-fine information integration in human vision. *Neuroimage*, *186*, 103–112.

Peyrin, C., Michel, C. M., Schwartz, S., Thut, G., Seghier, M., Landis, T., . . . Vuilleumier, P. (2010). The neural substrates and timing of top-down processes during coarse-to-fine categorization of visual scenes a combined fMRI and ERP study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22*(12), 2768–2780.

Pinti, P., Tachtsidis, I., Hamilton, A., Hirsch, J., Aichelburg, C., Gilbert, S., & Burgess, P. W. (2020). The present and future use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for cognitive neuroscience. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1464*(1), 5–29.

Roberts, D. J., Woollams, A. M., Kim, E., Beeson, P. M., Rapcsak, S. Z., & Ralph, M. A. L. (2013). Efficient visual object and word recognition relies on high spatial frequency coding in the left posterior fusiform gyrus: Evidence from a case-series of patients with ventral occipito-temporal cortex damage. *Cerebral Cortex*, *23*(11), 2568–2580.

Sato, H., Kiguchi, M., Maki, A., Fuchino, Y., Obata, A., Yoro, T., & Koizumi, H. (2006). Within-subject reproducibility of near-infrared spectroscopy signals in sensorimotor activation after 6 months. *Journal of Biomedical Optics*, *11*(1), 014021.

Siok, W. T., Niu, Z., Jin, Z., Perfetti, C. A., & Tan, L. H. (2008). A structural-functional basis for dyslexia in the cortex of Chinese readers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *105*(14), 5561–5566.

Siok, W. T., Perfetti, C. A., Jin, Z., & Tan, L. H. (2004). Biological abnormality of impaired reading is constrained by culture. *Nature*, *431*(7004), 71–76.

Stoeckel, M. C., & Binkofski, F. (2010). The role of ipsilateral primary motor cortex in movement control and recovery from brain damage. *Experimental Neurology*, *221*(1), 13–17.

Sun, Y. F., Yang, Y. H., Desroches, A. S., Liu, L., & Peng, D. L. (2011). The role of the ventral and dorsal pathways

in reading Chinese characters and English words. *Brain and Language*, *119*(2), 80–88.

Tan, L. H., Laird, A. R., Li, K., & Fox, P. T. (2005). Neuroanatomical correlates of phonological processing of Chinese characters and alphabetic words: A meta-analysis. *Human Brain Mapping*, *25*(1), 83–91.

Tan, L. H., Liu, H. L., Perfetti, C. A., Spinks, J. A., Fox, P. T., & Gao, J. H. (2001). The neural system underlying Chinese logograph reading. *Neuroimage*, *13*(5), 836–846.

Tan, L. H., Spinks, J. A., Feng, C. M., Siok, W. T., Perfetti, C. A., Xiong, J. H., . . . Gao, J. H. (2003). Neural systems of second language reading are shaped by native language. *Human Brain Mapping*, *18*(3), 158–166.

Tan, L. H., Spinks, J. A., Gao, J. H., Liu, H. L., Perfetti, C. A., Xiong, J. H., . . . Fox, P. T. (2000). Brain activation in the processing of Chinese characters and words: A functional MRI study. *Human Brain Mapping*, *10*(1), 16–27.

Tian, F. H., Lin, Z.-J., & Liu, H. L. (2013). EasyTopo: A toolbox for rapid diffuse optical topography based on a standard template of brain atlas. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, *8578*, 85782J.

Wang, H., & Legge, G. E. (2018). Comparing the minimum spatial-frequency content for recognizing Chinese and alphabet characters. *Journal of Vision*, *18*(1), 1–13.

Wang, X., Yang, J., Shu, H., & Zevin, J. D. (2011). Left fusiform BOLD responses are inversely related to word-likeness in a one-back task. *Neuroimage*, *55*(3), 1346–1356.

Winsler, K., Holcomb, P. J., Midgley, K. J., & Grainger, J. (2017). Evidence for separate contributions of high and low spatial frequencies during visual word recognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, *11*, 324.

Woodhead, Z. V., Wise, R. J., Sereno, M., & Leech, R. (2011). Dissociation of sensitivity to spatial frequency in word and face preferential areas of the fusiform gyrus. *Cerebral Cortex*, *21*(10), 2307–2312.

Wu, C.-Y., Ho, M.-H. R., & Chen, S.-H. A. (2012). A meta-analysis of fMRI studies on Chinese orthographic, phonological, and semantic processing. *Neuroimage*, *63*(1), 381–391.

Yang, J. F., Wang, X. J., Shu, H., & Zevin, J. D. (2011). Brain networks associated with sublexical properties of Chinese characters. *Brain and Language*, *119*(2), 68–79.

Ye, J. C., Tak, S., Jang, K. E., Jung, J., & Jang, J. (2009). NIRS-SPM: Statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy. *Neuroimage*, *44*(2), 428–447.

Zhao, J., Bi, H. Y., & Qian, Y. (2013). The influence of visual magnocellular pathway on the recognition of Chinese character. *Progress in Biochemistry and Biophysics, 40*(2), 141–146.

[赵婧，毕鸿燕，钱怡. (2013). 视觉大细胞通路对汉字识别的影响. *生物化学与生物物理进展*, *40*(2), 141–

146.]

Zhao, J., Qian, Y., Bi, H. Y., & Coltheart, M. (2014). The visual magnocellular-dorsal dysfunction in Chinese children with developmental dyslexia impedes Chinese character recognition. *Scientific Reports*, *4*, 7068.

Zhao, R., Fan, R., Liu, M. X., Wang, X. J., & Yang, J. F. (2017). Rethinking the function of brain regions for reading Chinese characters in a meta-analysis of fMRI studies. *Journal of Neurolinguistics*, *44*, 120–133.

fNIRS evidence for left middle frontal gyrus involved in visual-spatial analysis of Chinese characters

CHEN Fakun, CHEN Tian, CAI Wenqi, WANG Xiaojuan, YANG Jianfeng

(*School of Psychology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China*)

Abstract

The left middle frontal gyrus (MFG) is a typcial region identified in the brain mechanism of Chinese character reading. A common view suggests that the MFG is responsible for visual-spatial processing in reading Chinese characters, since the Chinese writing system has extremely complex structures. However, this explanation has not received direct evidence. Moreover, which kind of visual-spatial analysis underlying the MFG's activation is not clear. The current functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) study examined the functional role of the MFG in Chinese character reading by directly manipulating the spatial frequency characteristics of the Chinese character materials.

The experiment adopted a 3 (characters type: Real, Pseudo, and Artificial character) by 3 (spatial frequency: Full, Low, and High spatial frequency) within-participant factorial design. All Real characters were phonograms contained two components: phonetic and semantic radicals. The phonetic radical was not pronounceable and meaningless. The semantic radical was not pronounceable and meaningful that can provide the meaning category. The Pseudo characters were created by switching the position of radicals from Real characters. The Artificial characters were scrambled strokes from Pseudo characters. Each type of character was presented in three ways with different spatial frequencies: Full, Low, and High spatial frequency. In the Full spatial frequency, items were typical stimuli. In the Low and High spatial frequency, items were spatially filtered by Gaussian filter to remain the low/high spatial frequency features. Each type of character has 60 stimuli. All 540 stimuli for nine conditions were presented in 6 runs. Each run contained 1~2 blocks for each condition and lasted for about 8 minutes. Thirty-one participants took part in the experiment to perform a one-back task in each block by detecting whether the current stimulus was the same as the previous one. Meanwhile, a multi-channel fNIRS system was used to record brain activity at the left MFG.

The results found a significant main effect of character type at left MFG. The activation of

MFG was stronger for Pseudo character than for Real and Artificial character. The left MFG also showed a significant interaction between character type and spatial frequency. The difference among the three types of characters was significant for Low spatial frequency but not for Full and High spatial frequency. For materials presented in Low spatial frequency, Pseudo characters elicited more robust activation than Real and Artificial characters. These results suggested that the left MFG was sensitive to the spatial information of Chinese characters, especially for materials presented in low spatial frequency and for materials that required more graphemic/orthographic processing.

In sum, the finding provided direct evidence that the left MFG engaged in visual-spatial processing in Chinese character reading.

Key words Chinese character reading, Middle Frontal Gyrus, spatial frequency, fNIRS

附件：MFG 相关通道之外的自变量效应

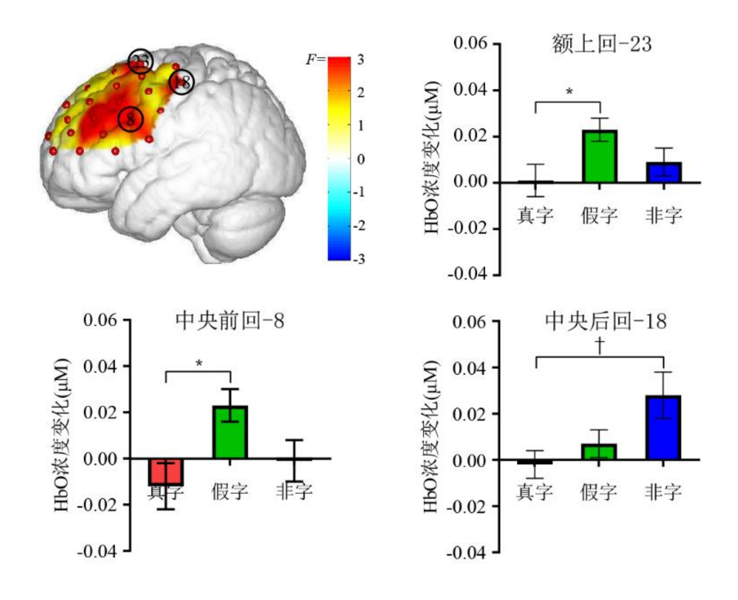
结果 1：字类型主效应显著的通道

3×3 的重复测量方差分析结果(见附表 1)发现字类型主效应显著的有通道 8(中央前回)、18(中央后回)和 23(额上回) (脑区定位见附图 1 左上)。字类型和空间频率交互作用显著的有通道 41(枕中回) (脑区定位见附图 2 左)。

附表 1 非额中回通道方差分析主效应和交互作用显著的通道

通道	字类型			交互作用		
	$F(2,54)$	p	η_p^2	$F(4,108)$	p	η_p^2
8(中央前回)	3.23	0.047	0.107	/	/	/
23(额上回)	4.15	0.021	0.133	/	/	/
18(中央后回)	4.09	0.022	0.131	/	/	/
41(枕中回)	/	/	/	2.73	0.033	0.092

对字类型主效应显著的非额中回通道进行多重比较的统计结果，详见附表 2。如附图 1 所示，多重比较发现通道 8(中央前回)和 23(额上回)表现出和额中回相同的字类型差异模式，即真字与非字的 HbO 浓度变化没有显著差异，而假字的 HbO 浓度变化要显著高于真字条件，也要高于非字条件(假字与非字的差异没有达到显著性水平)；但是，在通道 18(中央后回)上的多重比较结果表现出不同的字类型差异模式，即真字与假字之间的差异不显著，非字的 HbO 浓度变化要大于真字与假字条件(非字与真字的差异在校正后边缘显著，非字与假字的差异没有达到显著性水平)。结果表明仅保留正字法信息的假字需要更多额叶脑区(通道 8/23)的参与，而非字需要中央后回的激活。



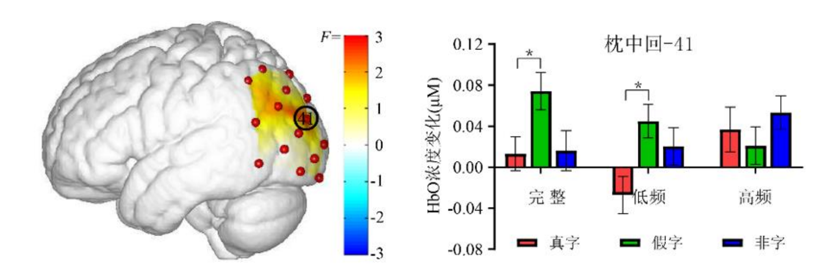
附图 1 字类型主效应 F 值热力图(左上)以及非额中回通道下的字类型差异

附表 2 非额中回通道字类型效应的多重比较结果

通道	真字 vs. 假字			真字 vs. 非字			假字 vs. 非字		
	t (27)	*p*	Cohen *d*	*t* (27)	*p*	Cohen *d*	*t* (27)	*p*	Cohen *d*
8（中央前回）	-2.63	0.014	0.81	-0.70	0.493	0.21	1.75	0.091	0.57
23（额上回）	-2.96	0.006	0.70	-1.07	0.296	0.25	1.72	0.097	0.47
18（中央后回）	-1.20	0.242	0.29	-2.50	0.019	0.64	-1.68	0.105	0.43

结果 2：枕中回通道发现字类型与空间频率的交互作用

和额中回交互作用模式不同的是，枕中回通道 41 的简单效应分析表明，该通道显著的交互作用是因为三种字类型在完整($F(2, 54) = 3.12$, $p = 0.052$)和低频条件($F(2, 54) = 4.48$, $p = 0.016$)下差异显著，而在高频条件下的差异不显著($F(2, 54) = 0.70$, $p = 0.500$)。多重比较的结果显示(见附表 3 和附图 2 右)，在完整和低频条件下的字类型差异主要来源于假字比真字需要更多的枕中回的激活。



附图 2 交互作用 *F* 值热力图(左)以及枕中回显著通道下各条件的差异结果(右)

附表 3 枕中回(通道 41)不同空间频率下真字、假字和非字的两两比较结果

条件	真字 vs. 假字			真字 vs. 非字			假字 vs. 非字		
	t (27)	*p*	Cohen *d*	*t* (27)	*p*	Cohen *d*	*t* (27)	*p*	Cohen *d*
完整	-2.66	0.013	0.50	-0.10	0.919	-0.02	2.03	0.052	0.38
低频	-2.60	0.015	0.49	-2.06	0.049	-0.39	1.11	0.279	0.21
高频	0.77	0.447	0.15	-0.52	0.608	-0.10	-1.14	0.264	0.22